



原行星状星云中盘的化学简述

孙浩民*, 张泳*

中山大学物理与天文学院, 珠海 519082

* 联系人, E-mail: sunhm23@mail2.sysu.edu.cn; zhangyong5@email.sysu.edu.cn

2024-10-13 收稿, 2025-02-24 修回, 2025-03-08 接受, 2025-03-10 网络版发表

国家自然科学基金(12473027)资助

摘要 原行星状星云是晚期恒星演化过程中从渐进巨星分支到行星状星云的一个过渡阶段, 其光谱研究表明复杂有机物大量形成. 近年来, 高空间分辨率的观测表明, 原行星状星云的星周包层通常呈现非球对称的结构, 但形态转化的机制目前尚未完全理解. 原行星状星云的演化时标和抛出物质成分明确, 因而是研究星周化学的理想实验室. 原行星状星云中的盘结构非常普遍, 可能是揭示其化学演化的关键. 本文对原行星状星云中盘的形成和观测、所发现的分子及其化学模型进行了综述, 比较了原行星状星云中的盘与年轻恒星中原行星盘的差异. 原行星状星云的盘中可能存在丰富的化学过程, 值得进一步开展观测和理论研究.

关键词 演化晚期恒星, 星周盘, 原行星状星云, 天体化学

初始质量在大约 $0.8\sim 8 M_{\odot}$ 之间的恒星演化到晚期阶段将进入渐进巨星分支(asymptotic giant branch, AGB)阶段. AGB阶段持续时间约为0.1万年~2000万年. 在此期间, 恒星的半径可能达到1个天文单位(au), 亮度可能达到当前太阳亮度的数千倍, 外围温度很低, 形成的大量尘埃遮蔽了中心星, 尘埃所受的强大的辐射压带动气体以星风的形式抛出物质(质量流失率为 $10^{-8}\sim 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$), 这些物质会逐步在恒星周围形成一个不断膨胀的星周包层(circumstellar envelope, CSE)^[1,2]. 随后, 风将持续剥离恒星的外部包层, 当剩余包层的质量小于恒星总质量的约1%时, 恒星演化进入后渐进巨星分支(post asymptotic giant branch, post-AGB)阶段. 这一阶段较为短暂, 大约持续数千年, 期间恒星温度逐渐升高, 当中心恒星的温度达到约30000 K时, 开始电离星周包层, 最终包层被完全电离从而转变为拥有一个炽热核心的行星状星云(planetary nebulae, PN). PN的生命周期大约为20000年, 之后会快速消散掉, 中心恒星慢慢冷却后留下一个惰性的白矮星. 星周

包层中发生丰富的化学反应, 部分星周分子将扩散到星际空间, 成为下一代恒星形成区的化学种子. 因此, 研究演化晚期恒星星周化学对于理解星系物质循环至关重要.

值得注意的是, 并非所有的post-AGB都会在其包层消失之前进行光电离从而形成PN, 例如, RV Tauri就是一例不会演化成PN的post-AGB^[3]. 我们把能从post-AGB阶段演化至PN阶段的对象称为原行星状星云(proto-planetary nebulae, PPN)^[4]. 随着观测手段不断提高, 最近几十年的高分辨率观测表明, 在PPN阶段大部分星周包层在形态结构上会发生变化, 普遍表现出非球对称性^[5]. 其结构包括从小尺度($\sim 100 \text{ au}$)的高密度团块到大尺度($\sim 10^4 \text{ au}$)的双极、螺旋形或盘状结构^[6-8], 这表明引起恒星表面物质抛出的辐射压力并非各向同性的, 其中涉及更多复杂的物理过程. 这一变化发生在非常短的时间内, 并且AGB阶段末期的高质量损失率使得恒星周围包层的光深增加, 遮蔽了内部结构, 这增加了探索不对称性产生机制的难度. 目前多种

引用格式: 孙浩民, 张泳. 原行星状星云中盘的化学简述. 科学通报, 2025, 70: 5089–5101

Sun H-M, Zhang Y. A brief introduction of chemistry in the disks of protoplanetary nebulae (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5089–5101, doi: [10.1360/TB-2024-1069](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1069)

不同的假设被提出了解释包层的这种不对称性, 包括但不限于: 恒星的快速自转导致其在赤道方向出现密度增强^[9]; 磁场的存在使得恒星风沿着磁场线流动进而形成了特定的几何结构^[9]; 双星系统中伴星的存在使得质量损失主要发生在赤道平面上^[10,11]. 在星云塑形过程中, 是单一机制或多种机制共同起作用以及何种机制是关键, 目前还尚不明确.

PPN的中心星通常属于F型到G型光谱^[12], 演化时标很短(~1000年), 其物理环境急剧变化, 导致其中的分子成分发生明显的变化. 但由于观测样本较少, 其中具体发生的化学过程目前还所知甚少. 盘状结构是PPN中较为典型的一种形态. PPN的抛出物初始组分(母分子)由萨哈方程和质量作用定律决定^[13], 所以较为明确. 另一方面, 盘的动力学时标容易获得, 从而限制了化学反应时标. 因此, PPN盘是研究晚期恒星化学演化过程的理想实验室. 本文将回顾过去几十年在近红外、中红外和射电波段对PPN中盘结构的研究, 讨论这些盘的分类, 比较不同盘中分子种类的异同, 并将PPN盘与在恒星形成初期的原行星盘(protoplanetary disk)进行对比.

1 星周包层的观测

星周包层的外部温度较低, 大部分星周物质仍处于气相状态, 典型的尘埃/气体质量比约为1%, 这些气态分子的低能量转动跃迁主要集中在厘米波和(亚)毫米波的范围. 同时, 射电波段的辐射可以穿透包层中的尘埃, 使得我们能够探测到其中的分子. 因此, 射电观测已经成为探测星周包层中分子的有效工具. 随着大口径的单碟射电望远镜(FAST、GBT、Effelsberg等)以及大型的射电干涉阵列(VLA、NOEMA、ALMA等)等科学装置的运行, 不断有新的分子在晚期恒星的星周包层中被发现, 其中既包括CO、CN、CS、OH等较为常见的简单分子, 也包括HC₃N、C₄H、CH₃CN等在包层中较难形成的复杂分子. 丰度高且稳定的CO可以从靠近恒星的位置一直追踪到包层的远端, 其分子线发射探测可以用于追踪包层动力学并通过使用不同线型成分确定演化恒星的质量损失(历史)^[14,15]. 此外, CO的旋转线发射能有效示踪¹²C/¹³C的比率, 这个比率是评估内部核合成和掺混过程的重要指标, 其值的范围通常在10~25^[16].

PPN处于AGB到PN的演化过渡阶段, 目前观测到的样本较为稀少. 由于中心恒星被较厚的包层遮挡, 因

此仅通过可见光来观测PPN是比较困难的, 只在富碳post-AGB的紫外-光学光谱中检测到了分子的电子跃迁^[17]. PPN的光学性质主要由尘埃颗粒决定: 在富氧的包层中, 主要存在的是硅酸盐颗粒^[18,19], 而在富碳的包层中, 则以混合的无定形碳(hydrogenated amorphous carbon, HAC)、碳化硅和芳香族化合物(例如多环芳香烃, polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)为主^[20~22]. 这些分子的振动带特征出现在中红外波段, 硅酸盐的振动带位于9.7和18 μm , 碳化硅的振动带位于11.3 μm , 而芳香族化合物的振动带则分布在3.3、6.2、7.7、8.6和11.3 μm , 这些红外波段发射特征的认证还存在争议, 被称为未识别红外发射(unidentified infrared emission, UIE)^[23]. 已有相关研究利用红外空间望远镜(infrared space observatory, ISO)的光谱详细研究了UIE的多个特征之间的关联以及这些特征可能的载体^[23]. 此外, 这些多尘的不透明包层主要在相同的波长范围内发射连续的热辐射. 这种从较热到较冷的能量转移导致内部包层和内尘凝结区域在中红外波段具有显著的辐射. 一个典型的例子是分子氢, 分子氢是宇宙中最丰富的分子, 但在AGB星中并未被观测到. 相反, 它在post-AGB星中通过近红外光谱的旋转-振动谱线S(1) $v=1\rightarrow2$ (波长为2.122 μm)被成功探测到^[24]. 地球大气对中红外波段的吸收和散射导致了我们必须依赖空间望远镜对其进行研究, 系统性搜寻PPN候选体的工作是在1983年红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)发射之后才开始的, 1994~2000年, Parthasarathy和Hrivnak等人^[25~27]利用IRAS数据库根据观测对象的红外过量辐射和星周尘埃壳层的颜色识别出约50个PPN以及相同数量的候选体. 它们显示出双峰的光谱能量分布(spectral energy distribution, SED), 中红外波段的峰值来自星周尘埃的再辐射发射, 而可见光至近红外的峰值则来自红化的光球. 光谱类型范围从B0到K0. 后续Hrivnak等人^[28,29]经过15年对PPN光变的监测, 识别出了约40个PPN候选体.

受限与浓厚的尘埃包层和极短的演化时标, PPN的高质量成像观测研究具有较强的挑战性, 在中等角分辨率(5"~10")下进行了成像观测的PPN不足30个, 而具有更高角分辨率(<1")观测的PPN仅10余个, 这极大限制了对星云结构的复杂性与非球对称性的研究. 近年来, 天文观测仪器的灵敏度和分辨率都大大提升, 在未来我们期待通过高质量观测来解析PPN的结构、研究

星周包层动力学特征,为理解PPN的形成和演化过程及其中的化学过程提供有价值的线索.

2 晚期恒星的星周盘

2.1 盘的形成

在PPN中观测到的这些不对称结构中,有一类沿着赤道方向产生密度增强,我们统称之为星周盘.星周盘形态特征明显,结构单一,目前普遍被认为是双星相互作用的结果.早期AGB阶段的恒星的抛出物受到伴星引力的影响,质量流失会集中在双星的轨道平面方向,在演化过程中形态结构偏离球对称性从而形成双星共同包层(common envelope, CE)^[30].1998年, Sandquist等人^[31]发现, CE相互作用的中间阶段,残余双星周围形成了类似厚盘的不同旋转结构. Soker等人^[32]通过理论分析得到了类似的厚盘结构. De Marco等人^[33]提出,在CE结束时仍与双星系统绑定的包层物质将会重新落回系统,形成一个环双星盘,而这样的盘可能对双星的周期产生一定的动力学影响,双星的轨道角动量传递导致盘的扩张.近年来,已有相关的双星系统盘模型被开发并在一定程度上重现了盘状结构的观测结果^[34,35].值得注意的是,目前的观测结果显示,盘结构出现在富氧的PPN中的比例远高于富碳,相关研究认为这是含碳尘埃受到更大的辐射压,从而被加速到更高的速度,不能满足形成盘结构所需要较低物质抛出速度的条件导致的^[5].

2.2 盘的观测与分类

目前发现的PPN星周盘约20~30个^[36],其中大部分是经过红外和射电波段的成像观测到的.例如,在红外波段, Sahai等人^[37]利用哈勃空间望远镜发现富碳的21 μm post-AGB源IRAS 04296+3429拥有一个与赤道夹角约70°的星周盘结构; Kwok等人^[38]发现IRAS 17106-3046的包层中存在一个密度增强的星盘; Tuthill等人^[39]使用凯克望远镜(Keck Telescope)的散斑数据,通过双谱散斑干涉测量方法重建了红矩形星云(Red Rectangle)在近红外(2.1~3.3 μm)波段的衍射极限图像,其图像揭示了红矩形星云的双星特性并表明其星周存在一个由中心到外围逐渐变厚的翘曲厚盘; Deroo等人^[40]利用MIDI和AMBER分别进行近红外和中红外观测,确定IRAS 08544-4431的星周存在一个稳定的双星盘; Tanner等人^[41]通过赫歇尔空间天文台(Herschel

Space Observatory)在100和160 μm 波段上发现TYC 9340-437-1存在一个面向我们的星周盘结构.从红外观测数据和理论模型的结合中得出的信息表明,具有过量红外超的环双星盘结构普遍较为稳定,其中尘埃颗粒的生长相当显著,表现为高度结晶化.在这些PPN盘中,直径达到1 mm的尘埃颗粒非常丰富,这可能是一些较大天体的前身,盘中还存在不稳定性和尘埃陷阱,可能形成第二代行星.在射电波段, Zijlstra等人^[42]利用甚大阵(the Very Large Array, VLA)观测了一批具有不规则OH光谱的post-AGB,其中IRAS 07399-1435的包层显示出一个密集的环状结构; Nakashima等人^[43,44]利用亚毫米波阵列(Submillimeter Array, SMA)和CARMA干涉阵列分别对富碳的post-AGB源IRAS 07134+1005以及IRAS 22272+5435进行了观测,均在其中发现了盘结构的存在.此外,PPN盘中的大分子辐射极其暗弱,很多源仅CO线能够进行高空间分辨率观测.

根据目前的观测,赤道密度增强而产生的盘状结构分为两类^[45]:第一类盘通常位于呈现出沙漏形状的PPN的中心腰带处,被认为是由距离较近的双星系统在共同包层阶段形成的.在这一阶段,伴星与巨星核心在共同包层中发生快速的螺旋内落,将轨道角动量转移给包层,最终导致包层物质被剧烈抛射,残留的部分包层在系统周围形成盘状结构,这类盘的寿命较短.例如,由哈勃望远镜观测到的IRAS 04296+3429^[37](图1(a))和ALMA观测到的IRAS 16342-3814属于这类盘.另一类是具有开普勒旋转的盘,这类盘较为稳定,物质运动遵循开普勒定律,其轨道速度 v 与轨道半径 R 成反比,盘内层物质比外层物质旋转得更快.这种盘的形成机制被认为是:当伴星与主星的距离较远时,主星的物质通过洛希瓣溢出(Roche lobe overflow, RLOF)流向伴星,由于角动量守恒形成吸积盘.由于RLOF是一个持续且稳定的过程,这类盘通常较为致密,具有较大的角动量且寿命更长,如ALMA观测的Red Rectangle和L₂ Pup^[46](图1(b)).由于两类盘的样本都比较有限,目前关于它们的形成和演化细节依然存在争议.近年来,利用ALMA的高角分辨率对HD101584和OH231.8+4.2等样本的观测结果^[47,48]显示:这些PPN盘的内部存在着极多无法用简单的盘结构模型来解释的嵌套结构或亚结构,这意味着PPN的形成与演化历史可能比基于中等角分辨率的CO成像观测所推测的复杂得多.因此,研究这两类不同的盘的形成机制对认识PPN的不同演化历史有重要意义.

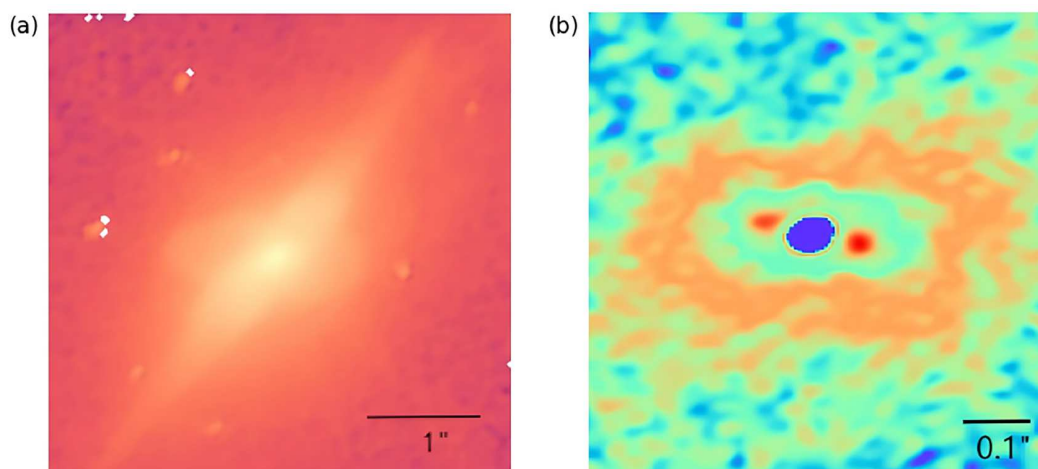


图 1 (网络版彩色)(a) IRAS 04296+3429, 由哈勃望远镜F555W滤光片拍摄. 图中星周盘清晰, 并在两级伴有明显的叶片结构. (b) L_2 Pup的CO ($J=3-2$)发射图像, 由ALMA望远镜观测得到. CO ($J=3-2$)气体示踪的开普勒盘围绕中心恒星, 其结构清晰可见

Figure 1 (Color online) (a) IRAS 04296+3429, captured by the Hubble Space Telescope using the F555W filter. The image clearly shows the circumstellar disk, with distinct lobe structures at both ends. (b) CO ($J=3-2$) emission image of L_2 Pup, observed by the ALMA telescope. The CO ($J=3-2$) gas traces the Keplerian disk around the central star, and its structure is visible

2.3 星周盘上的化学

AGB星包层中的温度较低, 这意味着大部分气体处于分子态^[49]. 在众多星周分子中, CO的键能大, 因而会被优先形成从而消耗掉大部分的C或者O, 星周化学很大程度上取决于剩余的C或O. 根据不同的C/O比例, 可以将晚期恒星的包层分为三类: C/O比小于1的M型星(富氧)、C/O比约等于1的S型星和C/O比大于1的C型星(富碳). 质量不太大的AGB星在第三次挖掘的作用下可由一颗M型星转化为C型星, 这种转化对金属丰度较低的星更为高效. 在富氧包层中, 绝大部分的C被锁在CO中, 多余的O则形成含氧分子, 如SiO、SO₂、SO、OH、H₂O等, 除CO外的含碳分子则较为罕见. 而富碳环境中CO耗尽了O, 剩余的C则形成含碳分子, 如HCN、HC_{2n+1}N、C₂S、CS以及富勒烯等^[50]. 这些分子在宇宙射线和星际辐射场的作用下, 会进行不同程度的光解与光化学反应, 迄今为止已经有近100种不同的分子在星周包层中被发现^[49]. 它们随着恒星风被抛向宇宙, 使得星周包层成为恒星向星际介质(interstellar medium, ISM)进行物质增丰的重要媒介.

AGB星表面的气体具有较高的温度和密度, 物质以离子、原子和简单分子组成, 其相对丰度可用平衡态化学来决定, 而观测到的大多数自由基如CN、HNC、NH₃、氰多炔等不能在此条件下形成^[51]. 随着

包层膨胀温度和密度降低, 可以粗略假设温度与距离成反比($T \propto r^{-1}$), 密度与距离的平方成反比($n \propto r^{-2}$). 尘埃在距离恒星 $5R \sim 20R$ (R 为恒星半径)处开始形成, 经过尘埃形成区后, 温度和密度持续下降, 包层的外边缘温度约为25 K, 密度约为 10^5 粒子/cm³, 延展包层化学主要发生在距离中心星 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{18}$ cm范围内, 由星际辐射驱动. 在PPN阶段, 外流偏离了球对称性, 使得星周包层在不同方向上的化学过程存在差异. 来自星际辐射以及逐渐升温中心星的紫外光子会电离或解离母体分子, 引发离子-中性和自由基-中性分子反应, 增加了包层的分子复杂性.

不同类型的PPN中发生的化学过程存在差异. 在富碳天体中, 初始的光解反应链是从来自内部的母体分子C₂H₂和HCN开始, 这些反应由宇宙射线和星际紫外辐射驱使, 可以产生丰富的C₂H₂⁺、H₃⁺、H₃O⁺和HCO⁺. 延展包层的密度极低, 通常的分子反应非常慢. 1985年, Glassgold和Huggins^[52]提出了离子-分子反应, 解释了C₃H、C₃、C₄H、HC₃N、HNC、SiC₂、C₂S、C₃S等分子的合成. 这里的化学主要由含有长碳链、硅和金属(如镁、钠和铝)的分子主导, 与分子云中的化学过程有很大的不同. 目前在富氧的天体中检测到的分子相对较少, 截至2022年, 只有34种分子在富氧AGB中被探测到^[53]. 即使在被广泛研究的富氧晚期恒星IK Tau和VY CMa^[54]的星周包层中, 也仅识别出了10~12种化合物,

而在经典的富碳晚型星IRC+10216中已经检测到超过90种分子^[53]。但近些年的高灵敏度观测也在富氧包层中发现弱的碳分子辐射,其原因还尚不明确^[55]。

随着PPN到PN的演化,中心白矮星逐渐裸露,增强的紫外辐射导致星周物质的化学成分进一步变化。高能辐射引起分子的解离,化学复杂性急剧下降,理论上只有部分简单分子能在PN的演化后期存留。然而,在PN光谱中探测到芳香族和脂肪族化合物与富勒烯发射特征^[56],其化学合成机制是目前的热点研究问题。此前已经在CRL618这一富碳的PPN中检测到了最简单的芳香环——苯^[57],但是类似的芳香族化合物并未在已经被广泛研究的典型富碳AGB星IRC+10216中检测到。这暗示大尺寸的芳香族分子可能在PPN阶段通过光化学形成,这可能涉及从简单的碳氢化合物如C₂H₂开始逐步变为大分子的机制^[58],在这一过程中可能产生各类复杂有机分子。有些复杂有机物可能是揭开弥漫星际带(diffuse interstellar band, DIB)这一世纪之谜的关键。DIB是恒星光谱中位于光学和近红外的数百条弱而宽的吸收谱带,其波长与恒星速度无关,等值宽度与消光呈正相关。自20世纪初发现至今,仅5条DIB被确认来自C₆₀⁺,而PPN能够快速形成富勒烯和脂肪族/芳香族化合物,很可能是产生DIB的“化工厂”^[59]。部分富氧的PPN如OH231.8+4.2中还存在HNCO、HNCS、HC₃N和CH₃OH等罕见分子^[60]。这些分子的形成机制尚不明确,有研究认为激波可能是驱动其合成的有效机制^[61]。

2.3.1 富氧星周盘

目前的观测结果显示,拥有星周盘的晚期恒星大多是富氧的,其中包括了大部分如Red Rectangle等具有开普勒或亚开普勒旋转的盘、被广泛研究的含有盘结构包层的水喷泉源IRAS16342-3814等,以及一些具有脉泽发射的PPN盘如著名的Calabash Nebula (OH 231.8+4.2)^[62]。这些经典的富氧盘源中探测到的分子被总结在表1中。

2.3.2 富碳星周盘

富碳的星周盘相对富氧的盘比较少见,这些源通常伴随着红外与近红外波段的未认证辐射特征。射电干涉观测结果显示所有具有21微米特征的PPN均显示出盘状结构(如文献^[43])。21微米特征是指目前仅在极少数富碳的Post-AGB星周包层中探测到的位于约21 μm处的显著发射特征^[74]。21微米特征源罕见,这两种稀有现象同时出现可能并非偶然,可能暗示着盘结构的存在或许与21微米特征载体的形成相关联。表2总

结了当前在深入研究的富碳盘中发现的分子。

3 星周盘的化学模型

传统的星周化学模型是建立在一维球对称的几何假设之上,若考虑盘的存在,包层中不同方向和不同径向距离产生的化学过程不同,在垂直于盘的方向密度较低,因此化学合成效率相对较慢。此外,来自星际辐射场的紫外光子可以轻易穿过较为稀薄的包层从而引发分子的解离,产生丰富的自由基。而在盘的中平面,密度较高,可能更为有效地合成更复杂的分子,紫外光子变得光学厚,但高能宇宙射线可能穿透盘从而驱动内部的光化学,在此区域CO可能被解离持续释放出碳原子,进而产生碳化学^[35],这解释了富氧环境中的富碳分子存在。

既然盘的形成与双星系统有关,伴星的存在可能影响着星周化学。Ortiz等人^[78]发现部分AGB星具有X射线,并且辐射强度与远紫外超的强度相关,这可能来自高温伴星周围的吸积盘。此外,在具有双星系统的富氧包层om i Cet中检测到的C I辐射被认为是其白矮星伴星照射的结果^[79],而双星系统R Aqr的内星风的存在也可能是其白矮星引起的光解所导致^[79]。热伴星辐射对于包层化学复杂度的影响主要取决于其紫外辐射强度和包层所产生的消光。若辐射有足够的穿透力,包层中的母体物质可以被伴星辐射所电离或者解离,在盘的内部区域启动丰富的光驱动化学,不同尺寸分子的相对丰度取决于分子-分子反应与光子-分子反应之间的平衡。如果分子-分子反应占主导,包层内的化学复杂性会增加,这可能导致子体分子的丰度分布类似于母体分子,在密度较大的内区丰度较大,并且向外丰度逐渐降低;反之,如果光解反应占主导,可能导致分子的匮乏。Van de Sande等人^[34]模拟了三种恒星包层受到伴星的影响,红矮星伴星的影响较小,类太阳伴星显示出最大的影响,而白矮星伴星对于星周化学的影响介于二者之间。

目前的星周化学模拟主要是针对典型AGB星IRC+10216而建立的一维模型,演化晚期恒星星周盘的模型非常缺乏。Van de Sande等人^[35]为富氧AGB源L₂ Pup的气体盘开发了二维化学模型。该模型采用了类似行星盘模拟过程,对处于星际辐射场中的热而致密的盘进行了参数化,研究了盘的物理结构对其中化学过程的影响。结果表明,模拟产生的子体分子球对称富氧环境中的结果明显不同,盘内存在两种不同的化学过

表 1 典型的富氧星周盘中的分子

Table 1 The molecules of typical oxygen-rich disks

源名	分子	是否具有(亚)开普勒旋转
AC Her ^[63]	CO	是
	¹³ CO	
	SiO	
Red Rectangle ^[63]	CO	是
	¹³ CO	
	C ¹⁷ O	
	C ¹⁸ O	
	HCN	
	H ¹³ CN	
	SO	
	H ₂ O	
HD52961 ^[63]	CO	是
	CO ₂	
	C ₆₀	
AI CMi ^[63]	CO	是
	TiO	
	OH	
	H ₂ O	
IRAS 20056+1834 ^[63]	CO	是
R Scuti ^[63]	CO	是
	H ₂ O	
	SiO	
	CO ₂	
	TiO	
S pav ^[64]	CO	
	HCN	
	SO	
	SO ₂	
	H ₂ O	
	PO	
	TiO	
	OH	
	SiO	
T mic ^[64]	CO	
	HCN	
	CS	
	AlO	
	SO	
	SO ₂	
	H ₂ O	
	PO	
	SiO	
OH 231.8+4.2	HCO ⁺	
	H ¹³ CO ⁺	
	SO ⁺	
	N ₂ H ⁺	
	H ₃ O ⁺	

(续表1)

源名	分子	是否具有(亚)开普勒旋转
OH 231.8+4.2	SO ₂	
	NaCl	
	KCl	
	H ₂ O	
	SiO	
	SiS	
IRAS 08544-4431 ^[65]	¹² CO	
	CO	
EPLyac ^[66]	CO ₂	
IRAS 16342-3814 ^[67]	H ₂ O	
	OH	
	¹³ CO	
	CO	
	H ¹³ CN	
	SON	
	CS	
	²⁹ SiO	
	SO ₂	
	³⁴ SON	
L ₂ Pup ^[68]	CO	
	¹³ CO	
	SiO	
	²⁹ SiO	
	H ₂ O	
	SO ₂	
	SiS	
	SO	
HD 101584 (IRAS 11385-5517) ^[69]	CO	
	¹³ CO	
	OH	
	SiO	
M1-92 ^[70]	HCN	
	CO	
	¹³ CO	
	C ¹⁸ O	
	C ¹⁷ O	
	HCO ⁺	
	HCN	
	CN	
	HNC	
	SiO	
	SO	
	SH ₂	
	CS	
M2-56 ^[71]	NS	
	SO ⁺	
BOOMERANG NEBULA ^[72]	CO	
M2-9 ^[73]	CO	
	¹³ CO	

表 2 典型的富碳星周盘中的分子

Table 2 The molecules of typical carbon-rich disks

源名	分子	是否具有(亚)开普勒旋转	是否存在21微米特征
IRAS 04296+3429 ^[75]	C ₂		是
	C ₃		
89 Herculis ^[76]	CO	是	
	SiS		
	CS		
	C ¹⁸ O		
IRAS 22272+5435 ^[77]	CO		是
	¹³ CO		
	H ¹³ CN		
	C ₂ H		
	C ₄ H		
	HC ₃ N		
	SiC ₂		
	CS		
	C ³⁴ S		
	CN		
	CH ₃ CN		
	HCN		
	HNC		
IRAS 07134+1005 ^[77]	CO		是
	¹³ CO		
	HCN		
	HCO ⁺		
	CN		
	HNC		
IRAS 23304+6147 ^[77]	CO		是
	¹³ CO		
	C ₄ H		
	HC ₃ N		
	¹³ CN		
	SiS		
	SiC ₂		
	C ¹⁸ O		
IRAS 06530-0213 ^[77]	CO		是
	¹³ CO		
	HC ₃ N		
	C ₄ H		
	C ¹⁸ O		
	SiC ₂		
IRAS16594-4646 ^[77]	CO		是
	¹³ CO		

程：盘的中平面中宇宙射线驱动的化学反应和盘外部区域的紫外光子引导的光化学反应。两种机制的共同

作用解释了盘上分子的分布，并且预测即使在富氧环境中，盘的中平面上能够形成某些复杂有机分子，外部

区域可能形成碳链分子. 此外, 模拟结果显示经过百万年的时标, SO和SO₂在中平面中的分布出现空隙, 但此空隙并未被观测到^[46], 这表明L₂ Pup中盘的年龄小于10⁵年. 这个例子说明能够用星周分子的观测来推测盘的年龄. 在PPN阶段, 星周物质由于膨胀变得更加稀薄, 此时盘对化学的影响将更加突出, 但目前还没有较为精确的针对PPN盘的化学建模.

4 晚期恒星星周盘与原行星盘的对比

除了演化晚期恒星, 星周盘是年轻恒星形成时常见的结构. 在分子云坍缩形成恒星的过程中, 由于角动量守恒, 当星云的半径减小时, 旋转速度会增加. 随着坍缩的进行, 云的中心部分旋转得更快, 而外部的物质旋转得较慢, 形成了一个差异旋转的系统. 外部物质逐渐形成了盘状结构, 这个盘状结构是行星形成的摇篮. 盘靠近恒星的地方较热, 远离恒星的地方较冷, 这种特性使得它们在从微米到毫米的波长范围内都表现出强烈的辐射.

原行星盘在恒星形成的过程中产生, 因此其初始的化学组成很大程度上取决于星际介质以及原恒星(分子云)阶段的化学过程. 部分氧和碳以耐高温的尘埃颗粒的形式存在, 另一部分的碳、氧以及大部分氮和氢结合成H₂、CO、CO₂、N₂、NH₃和水等稳定分子, 这些分子在盘形成过程中仍然能够大量幸存下来. 同时, 分子云还能有效合成有机分子, 包括碳链、CH₄、CH₃OH以及更复杂的有机物. 这些星际分子和简单有机物整合到盘中, 组成了盘上主要的化学成分. 尘埃主导了原行星盘的不透明性, 并为形成行星提供了原材料. 星际介质中的尘埃主要由尺寸为 $r \leq 0.1 \mu\text{m}$ 的硅酸盐组成, 混合有碳质颗粒和多环芳香烃^[80]. 这些混合物在穿过冷暗星云到达原行星盘的过程中, 气态分子冻结在尘埃颗粒表面, 形成冰质外壳^[81], 这些较小的颗粒则通过碰撞聚集变为更大尺寸的颗粒^[82]. 原行星盘中的分子极其丰富, 如¹³CO、HCO⁺、H¹³CO⁺、DCO⁺、CS、HCN、HC₃N、DCN、CN、H₂CO、N₂H⁺、C₂H、C₃H₂等, 是目前的研究热点. 盘中的尘埃和气体分子可能为生命起源带来了种子.

将演化晚期恒星星周盘与原行星盘对比, 可以发现前者的温度通常更高, L₂ Pup的中平面温度为900 K, 而典型的原行星盘温度范围为100~300 K, PPN盘的温度甚至高达1400~3600 K. 此外, 演化晚期恒星盘的温度分布较为平缓, L₂ Pup的温度分布($T(r) \sim r^{-q}$)幂律指数

q 为0.2, 而原行星盘通常为0.5~0.7. 演化晚期恒星盘的表面密度分布($\Sigma(r) \sim r^{-\gamma}$)幂律指数(γ)介于1~3之间, 相比之下, 原行星盘的 γ 值通常小于或等于1. 这些物理差异主要归因于演化晚期恒星的高光度和炽热的恒星风^[35]. 由于演化时标和演化过程、母体分子、物理环境的不同, 原行星盘中观测到的分子品种远远大于PPN盘.

5 总结与展望

PPN是中小质量恒星生命即将结束前短暂出现的现象, 其形态结构多样化的成因至今尚未被完全理解. 盘状结构的出现一般被认为与双星演化有关. 由于目前观测到的PPN的样本数量依然很少, 理解这些大尺度的盘状结构的成因以及它们在AGB演化到PN的过程中扮演的角色依然存在困难. 尚未解决的问题包括但不限于: 那些没观测到盘结构的PPN与盘结构PPN是否代表了不同内在性质恒星的两种不同演化路径? 这种不同是由恒星本身的原因导致的, 还是受到了外部因素(伴星)的影响? 磁场是否对PPN盘的形成起作用? 在PPN盘中能否形成第二代行星? 这些问题有望在未来通过对大样本的PPN进行无偏统计研究以及对单个样本进行高角分辨率的详细观测来给出答案. 另一个未来发展的重要研究方向是PPN盘中的化学: 在PPN中探测到的多种分子预示着其中发生着复杂的化学反应, 这些化学过程与PPN盘的演化密切相关, 热伴星的存在可能在PPN内部驱动光化学反应. 为了更深入地理解晚期恒星的星周化学, 需要天文学家和化学家的紧密合作, 对星周盘进行物理和化学建模, 并通过定量计算来解释观测结果. 目前的模拟研究显示, 可以通过包层分子的高空间分辨率观测来探测中心星的性质和星周结构的年龄, 这将为解释PN的形态形成和恒星物质对星际空间反馈过程提供关键线索. 未来的研究需要系统且全面地通过完整的光谱巡测来获得PPN中的化学成分与各种物理参数的关系. 这些研究应与高角分辨率的观测研究相结合, 以全面了解驱动星云中不同区域分子形成的机制. 除了天文观测外, 化学建模工作也十分重要, 需要全面包含激波化学、X射线驱动光化学以及尘埃表面反应等, 这其中的化学反应途径和效率离不开实验室化学研究. 目前国内在这方面的研究刚刚起步, 但随着未来我国射电望远镜的建设和升级, 通过努力有机会发展到国际前沿, 我们期望通过本文能够吸引更多的天文和化学工作者投入该领域的研究.

参考文献

- 1 Olofsson H. Circumstellar molecular envelopes of AGB and post-AGB objects. *Astrophys Space Sci*, 1996, 245: 169–200
- 2 Yu Z Y. The evolution of circumstellar envelopes of low- and intermediate-mass stars in the first half of the AGB stage (in Chinese). *Chin J Nat*, 1992, 15: 555–556 [俞志尧. 中小质量恒星的拱星包层在AGB阶段前半段上的演化. *自然杂志*, 1992, 15: 555–556]
- 3 Giridhar S. Recent advances in RV Tauri stars. *J Astrophys Astron*, 2020, 41: 1–8
- 4 Jiang B W, Hu J Y. From AGB stars to planetary nebulae (in Chinese). *Progr Astron*, 1993, 11: 123–134 [姜碧涛, 胡景耀. 从AGB星到行星状星云. *天文学进展*, 1993, 11: 123–134]
- 5 Decin L, Montargès M, Richards A M S, et al. (Sub)stellar companions shape the winds of evolved stars. *Science*, 2020, 369: 1497–1500
- 6 Velilla Prieto L, Sánchez Contreras C, Cernicharo J, et al. The millimeter IRAM-30 m line survey toward IK Tauri. *Astron Astrophys*, 2017, 597: A25
- 7 Leão I C, de Laverny P, Mékarnia D, et al. The circumstellar envelope of IRC+10216 from milli-arcsecond to arcmin scales. *Astron Astrophys*, 2006, 455: 187–194
- 8 Khouri T, Maercker M, Waters L B F M, et al. Study of the inner dust envelope and stellar photosphere of the AGB star R Doradus using SPHERE/ZIMPOL. *Astron Astrophys*, 2016, 591: A70
- 9 Garcia-Segura G, Langer N, Rożyczka M, et al. Shaping bipolar and elliptical planetary nebulae: effects of stellar rotation, photoionization heating, and magnetic fields. *Astrophys J*, 1999, 517: 767–781
- 10 Nordhaus J, Blackman E G, Frank A. Isolated versus common envelope dynamos in planetary nebula progenitors. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: 599–608
- 11 Miszalski B, Acker A, Moffat A F J, et al. Binary planetary nebulae nuclei towards the Galactic bulge. *Astron Astrophys*, 2009, 496: 813–825
- 12 van Winckel H. Post-AGB stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2003, 41: 391–427
- 13 Omont A. Circumstellar chemistry. In: Greenberg J M, Pironello V, eds. *Chemistry of Space*. Bonn: Springer, 1991
- 14 Loup C, Forveille T, Omont A, et al. CO and HCN observations of circumstellar envelopes. A catalogue—Mass loss rates and distributions. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1993, 99: 291–377
- 15 Bujarrabal V, Castro-Carrizo A, Alcolea J, et al. Mass, linear momentum and kinetic energy of bipolar flows in protoplanetary nebulae. *Astron Astrophys*, 2001, 377: 868–897
- 16 Harris M J, Lambert D L, Hinkle K H, et al. Oxygen isotopic abundances in evolved stars. III - 26 carbon stars. *Astrophys J*, 1987, 316: 294–304
- 17 Hrivnak B J, Guinan E F, Lu W. a study of the chromospherically active, short-period binary VZ PISCUM. *Astrophys J*, 1995, 455: 300
- 18 Waters L, Molster F J, De Jong T, et al. Mineralogy of oxygen-rich dust shells. *Astron Astrophys*, 1996, 315: L361–L364
- 19 Speck A K, Barlow M J, Sylvester R J, et al. Dust features in the 10- μ m infrared spectra of oxygen-rich evolved stars. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 2000, 146: 437–464
- 20 Cohen M. Circumstellar envelopes and the evolution of carbon stars. *Mon Not R Astron Soc*, 1979, 186: 837–852
- 21 Lodders K, Fegley B Jr. Condensation chemistry of carbon stars. *AIP Conf Proc*, 1997, 402: 391–423
- 22 Höfner S, Olofsson H. Mass loss of stars on the asymptotic giant branch. *Astron Astrophys Rev*, 2018, 26: 1
- 23 Kwok S. The mystery of unidentified infrared emission bands. *Astrophys Space Sci*, 2022, 367: 16
- 24 Sahai R, Hines D C, Kastner J H, et al. The structure of the prototype bipolar protoplanetary nebula CRL 2688 (Egg Nebula): broadband, polarimetric, and H₂ line imaging with NICMOS on the Hubble Space Telescope. *Astrophys J*, 1997, 492: L163–L167
- 25 Hrivnak B J, Kwok S, Geballe T R. Near-infrared spectroscopy of proto-planetary nebulae. *Astrophys J*, 1994, 420: 783–796
- 26 Meixner M, Ueta T, Dayal A, et al. A mid-infrared imaging survey of proto-planetary nebula candidates. *ASTROPHYS J SUPPL S*, 1999, 122: 221–242
- 27 García-Lario P, Manchado A, Pych W, et al. Near infrared photometry of IRAS sources with colours like planetary nebulae. III. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1997, 126: 479–502
- 28 García-Lario P, Riera A, Manchado A. Optical and infrared observations of the bipolar proto-planetary nebula Henize 401. *Astrophys J*, 1999, 526: 854
- 29 Hrivnak B J, Reddy B E. An abundance analysis of the new carbon-rich proto-planetary nebula IRAS 06530–0213. *Astrophys J*, 2003, 590: 1049–1059
- 30 De Marco O. The origin and shaping of planetary nebulae: putting the binary hypothesis to the test. *Publ Astron Soc Pac*, 2009, 121: 316–342
- 31 Sandquist E L, Taam R E, Chen X, et al. Double core evolution. X. Through the envelope ejection phase. *Astrophys J*, 1998, 500: 909–922
- 32 Soker N. Why magnetic fields cannot be the main agent shaping planetary nebulae. *Publ Astron Soc Pac*, 2006, 118: 260–269
- 33 De Marco O, Passy J C, Moe M, et al. On the α formalism for the common envelope interaction. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 411: 2277–2292
- 34 Van de Sande M, Millar T J. The impact of stellar companion UV photons on the chemistry of the circumstellar environments of AGB stars. *Mon*

- Not R Astron Soc, 2022, 510: 1204–1222
- 35 Van de Sande M, Walsh C, Danilovich T, et al. Modelling predicts a molecule-rich disc around the AGB star L2 Puppis. *Mon Not R Astron Soc*, 2024, 532: 734–754
 - 36 Sánchez Contreras C. (Sub)mm-wavelength observations of pre-planetary nebulae and young planetary nebulae. *Galaxies*, 2020, 8: 21
 - 37 Sahai R. Discovery of a remarkable point-symmetric proto-planetary nebula: Hubble Space Telescope imaging of IRAS 04296+3429. *Astrophys J*, 1999, 524: L125–L128
 - 38 Kwok S, Hrivnak B J, Su K Y L. Discovery of a disk-collimated bipolar outflow in the proto-planetary nebula IRAS 17106–3046. *Astrophys J*, 2000, 544: L149–L152
 - 39 Tuthill P G, Men'shchikov A B, Schertl D, et al. Bispectrum speckle interferometry of the Red Rectangle: diffraction-limited near-infrared images reconstructed from Keck telescope speckle data. *Astron Astrophys*, 2002, 389: 889–895
 - 40 Deroo P, Acke B, Verhoelst T, et al. AMBER and MIDI interferometric observations of the post-AGB binary IRAS 08544-4431: the circumbinary disc resolved. *Astron Astrophys*, 2007, 474: L45–L48
 - 41 Tanner A, Plavchan P, Bryden G, et al. Herschel observations of disks around late-type stars. *PASP*, 2020, 132: 084401
 - 42 Etoka S, Zijlstra A, Richards A M, et al. The geometrical and magnetic structure of the proto-planetary nebula OH 231.8+4.2 traced by OH maser emission. In: *The Eighth Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics: a Tribute to Kam-Ching Leung*. AIP Conf Proc, 2009, 404: 311
 - 43 Nakashima J, Koning N, Kwok S, et al. Morphokinematic properties of the 21 μm source IRAS 07134+1005. *Astrophys J*, 2009, 692: 402–410
 - 44 Nakashima J, Koning N, Volgenau N H, et al. CO structure of the 21 μm source IRAS 22272+5435: a sign of a jet launch? *Astrophys J*, 2012, 759: 61
 - 45 Lagadec E. AGBs, post-AGBs and the shaping of planetary nebulae. *Galaxies*, 2018, 6: 99
 - 46 Kervella P, Homan W, Richards A M S, et al. ALMA observations of the nearby AGB star L₂ Puppis. *Astron Astrophys*, 2016, 596: A92
 - 47 Olofsson H, Khouri T, Maercker M, et al. HD 101584: circumstellar characteristics and evolutionary status. *Astron Astrophys*, 2019, 623: A153
 - 48 Sánchez Contreras C, Alcolea J, Bujarrabal V, et al. Through the magnifying glass: ALMA acute viewing of the intricate nebular architecture of OH 231.8+4.2. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2018, 618: A164
 - 49 Decin L. Evolution and mass loss of cool aging stars: a daedalean story. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2021, 59: 337–389
 - 50 Olofsson H. The neutral envelopes around AGB and post-AGB objects. *Symp-Int Astron Union*, 1997, 178: 457–468
 - 51 Cohen R J. Circumstellar matter. In: *Appenzeller I, Jordan C, eds. Proc IAU Symp.* Dordrecht: Reidel, 1987, 122: 229
 - 52 Glassgold A E, Huggins P J, Langer W D. Shielding of CO from dissociating radiation in interstellar clouds. *Astrophys J*, 1985, 290: 615–626
 - 53 Agúndez M. Molecules from evolved stars and their role in the cycle of the ISM. In: *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences, 2022, 265: 00029
 - 54 Kamiński T, Gottlieb C A, Young K H, et al. An interferometric spectral line and imaging survey of VY Canis Majoris in the 345 GHz band. *Astrophys J Suppl Ser*, 2013, 209: 38
 - 55 Herwig F. Evolution of asymptotic giant branch stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2005, 43: 435–479
 - 56 Kwok S, Zhang Y. Mixed aromatic-aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features. *Nature*, 2011, 479: 80–83
 - 57 Cernicharo J, Heras A M, Tielens A G G M, et al. Infrared space observatory's discovery of C₄H₂, C₆H₂, and benzene in CRL 618. *Astrophys J*, 2001, 546: L123–L126
 - 58 Cernicharo J. The polymerization of acetylene, hydrogen cyanide, and carbon chains in the neutral layers of carbon-rich proto-planetary nebulae. *Astrophys J*, 2004, 608: L41–L44
 - 59 Díaz-Luis J J, García-Hernández D A, Rao N K, et al. A search for diffuse bands in fullerene planetary nebulae: evidence of diffuse circumstellar bands. *Astron Astrophys*, 2015, 573: A97
 - 60 Sánchez Contreras C, Velilla Prieto L, Agúndez M, et al. Molecular ions in the O-rich evolved star OH231.8+4.2: HCO⁺, H¹³CO⁺ and first detection of SO⁺, N₂H⁺, and H₃O⁺. *Astron Astrophys*, 2015, 577: A52
 - 61 Sánchez Contreras C, Alcolea J, Bujarrabal V, et al. Through the magnifying glass: ALMA acute viewing of the intricate nebular architecture of OH 231.8+4.2. *Astron Astrophys*, 2018, 618: A164
 - 62 Bujarrabal V, Alcolea J, Sánchez Contreras C, et al. *HST* observations of the protoplanetary nebula OH 231.8+4.2: the structure of the jets and shocks. *Astron Astrophys*, 2002, 389: 271–285
 - 63 Gallardo Cava I, Bujarrabal V, Alcolea J, et al. Chemistry of nebulae around binary post-AGB stars: a molecular survey of mm-wave lines. *Astron Astrophys*, 2022, 659: A134
 - 64 Wallström S H J, Danilovich T, Müller H S P, et al. ATOMIUM: molecular inventory of 17 oxygen-rich evolved stars observed with ALMA. *Astron Astrophys*, 2024, 681: A50
 - 65 Maas T, Van Winckel H, Lloyd Evans T, et al. IRAS 08544–4431: a new post-AGB star in a binary system surrounded by a dusty disc. *Astron Astrophys*, 2003, 405: 271–283
 - 66 Gielen C, van Winckel H, Matsuura M, et al. Analysis of the infrared spectra of the peculiar post-AGB stars EP Lyrae and HD 52961. *Astron*

- [Astrophys](#), 2009, 503: 843–854
- 67 Morris M R, Sahai R, Claussen M. Dynamics of the molecular jets in the archetypical preplanetary nebula, IRAS 16342-3814. *Rev Mex Astron Astrofis*, 2003, 15: 20–22
- 68 Homan W, Richards A, Decin L, et al. ALMA observations of the nearby AGB star L₂ Puppis. [Astron Astrophys](#), 2017, 601: A5
- 69 Olofsson H, Nyman L Å. The circumstellar molecular envelope of HD 101584. *Astron Astrophys*, 1999, 347: 194–202
- 70 Alcolea J, Agúndez M, Bujarrabal V, et al. M 1–92 revisited: the chemistry of a common envelope nebula? In: *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2018, 14(S343): 343–344
- 71 Castro-Carrizo A, Bujarrabal V, Sánchez Contreras C, et al. The structure and dynamics of the molecular envelope of M 2–56. [Astron Astrophys](#), 2002, 386: 633–645
- 72 Sahai R, Vlemmings W H T, Huggins P J, et al. ALMA observations of the coldest place in the universe: the Boomerang Nebula. [Astrophys J](#), 2013, 777: 92
- 73 Castro-Carrizo A, Bujarrabal V, Neri R, et al. Structure and dynamics of the molecular gas in M 2–9: a follow-up study with ALMA. [Astron Astrophys](#), 2017, 600: A4
- 74 Zhang K, Jiang B W, Li A G. The 21 μm feature in circumstellar envelopes of evolved stars (in Chinese). *Progr Astron*, 2006, 24: 43–53 [张可, 姜碧涛, 李爱根. 演化晚期恒星周包层的21 μm 特征. *天文学进展*, 2006, 24: 43–53]
- 75 Klochkova V G, Szczerba R, Panchuk V E, et al. The peculiar post-AGB supergiant IRAS 04296+3429: optical spectroscopy and its spectral energy distribution. *Astron Astrophys*, 1999, 345: 905–914
- 76 Hillen M, Menu J, Van Winckel H, et al. An interferometric study of the post-AGB binary 89 Herculis. [Astron Astrophys](#), 2014, 568: A12
- 77 Qiu J J, Zhang Y, Nakashima J, et al. Gas-phase molecules in protoplanetary nebulae with the 21 μm emission feature. *AJ*, 2024, 167: 91
- 78 Ortiz R, Guerrero M A. Ultraviolet emission from main-sequence companions of AGB stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 461: 3036–3046
- 79 Saberi M, Vlemmings W H T, De Beck E, et al. Detection of CI line emission towards the oxygen-rich AGB star omi Ceti. [Astron Astrophys](#), 2018, 612: L11
- 80 Draine B T. Interstellar dust grains. [Annu Rev Astron Astrophys](#), 2003, 41: 241–289
- 81 Bergin E A, Tafalla M. Cold dark clouds: the initial conditions for star formation. [Annu Rev Astron Astrophys](#), 2007, 45: 339–396
- 82 Blum J, Wurm G. The growth mechanisms of macroscopic bodies in protoplanetary disks. [Annu Rev Astron Astrophys](#), 2008, 46: 21–56

Summary for “原行星状星云中盘的化学简述”

A brief introduction of chemistry in the disks of protoplanetary nebulae

Hao-Min Sun^{*} & Yong Zhang^{*}

School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

** Corresponding authors, E-mail: sunhm23@mail2.sysu.edu.cn; zhangyong5@email.sysu.edu.cn*

Stars with an initial mass between approximately 0.8 and 8 solar masses enter the asymptotic giant branch (AGB) phase during the late stages of their evolution. The AGB phase lasts for about 0.1–20 million years, during which the star’s radius can expand to approximately 1 astronomical unit, and its luminosity can increase to thousands of times the current solar luminosity. The temperature in the outer layers becomes very low, leading to the formation of substantial dust that obscures the central star. The strong radiation pressure acting on the dust drives gas outward in the form of stellar winds. These ejected materials gradually form an expanding circumstellar envelope around the star. Subsequently, the winds continue to strip the star’s outer envelope, and once the remaining envelope’s mass is reduced to about 1% of the star’s total mass, the star evolves into the post-asymptotic giant branch (post-AGB) phase. This phase is relatively short, lasting for only a few thousand years. During this time, the temperature of the star gradually increases, and when the central star’s temperature reaches approximately 30000 K, it begins to ionize the circumstellar envelope. Eventually, the envelope becomes fully ionized, transforming into a planetary nebula (PN) with a hot central core. Objects that evolve from the post-AGB phase to the PN phase are referred to as protoplanetary nebulae (PPNs). With advancements in observational techniques, high-resolution observations in recent decades have shown that during the PPN phase, most circumstellar envelopes undergo morphological changes and generally exhibit non-spherical symmetry. These structures range from small-scale high-density clumps to large-scale bipolar, spiral, or disk-like formations, suggesting that the radiation pressure driving the ejection of material from the stellar surface is not isotropic and involves more complex physical processes. These changes occur over very short timescales, and the high mass-loss rates at the end of the AGB phase increase the optical depth of the circumstellar envelope, obscuring the internal structure and making it more difficult to investigate the mechanisms behind the asymmetry. Currently, various hypotheses have been proposed to explain this asymmetry in the envelope, but the roles these mechanisms play in shaping the nebula remain highly debated. Disk-like structures are a typical form of envelope morphology during this transitional phase. Relatively well-defined evolutionary timescales and compositional components make them ideal laboratories for studying molecular chemical processes in the circumstellar envelopes of evolved stars. This paper reviews the formation and observations of circumstellar disks in PPNs, the molecules detected in typical circumstellar disks, and recent chemical modeling. Additionally, we compare the physical and chemical differences between PPN disks and protoplanetary disks. Our report highlights the presence of rich chemical processes within PPN disks and summarizes the unresolved issues in current studies of these disks, which warrant further observational and theoretical investigations.

evolved late-stage stars, circumstellar disks, protoplanetary nebulae, astrochemistry

doi: [10.1360/TB-2024-1069](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1069)